

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СВЕТОФОРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ В СРЕДЕ ANYLOGIC**

**С.А. Андронов (Санкт-Петербург)**

**Введение**

Автоматизированные системы управления дорожным движением (АСУД) являются ядром построения интеллектуальной транспортной системы (ИТС) города. Одной из перспективных областей в сфере управления дорожным движением являются адаптивные системы, которые "подстраиваются" под текущую дорожную ситуацию в зависимости от многих параметров. Благодаря наделению автономного светофора «локальным интеллектом», последний самостоятельно определяет динамику включения сигнальных групп.

Некоторые адаптивные алгоритмы [3-5] находят применение при разработке пакетов имитационного моделирования и не лишены недостатков. Реализованный в программе PTV Vision «VISSIM»[9] алгоритм, работает по количеству проезжающих через перекресток автомобилей, где запрещающий сигнал включается, когда последний автомобиль на одной из дорог покидает перекресток. Однако этот алгоритм не учитывает, по каким направлениям прибывают и убывают автомобили, а также пропускную способность каждого из направлений [4].

Наряду с такими подходами, как транспортно - зависимое управление с оптимизацией параметров регулирования в реальном времени, применяется также «мягкое» программирование светофорных объектов с использованием нечеткой логики (НЛ) [1]. При использовании аппарата НЛ дискретные уровни интенсивностей движения представляют непрерывной величиной, что в случае дорожного регулирования позволяет гибко приспособить задачу к особенностям трафика конкретного перекрестка путём обучения экспертным способом или на основе обучающей выборки.

В предлагаемой статье рассматривается опыт алгоритмизации светофорного регулирования с НЛ и разработки соответствующей имитационной модели в среде программного комплекса Anylogic[8] с целью оценки эффекта нечёткого регулирования по сравнению с работой светофора с фиксированной длительностью фаз. Вопросы применения НЛ для светофорного регулирования встречаются во многих работах, например, в [2], однако оценок эффективности их применения по сравнению с обычным светофором автору данной статьи встретить не удалось.

**Описание подхода**

Рассмотрим схему расстановки датчиков, которая является стандартной для применения адаптивных алгоритмов (рис.1). Первый датчик D1 устанавливается в удалении от

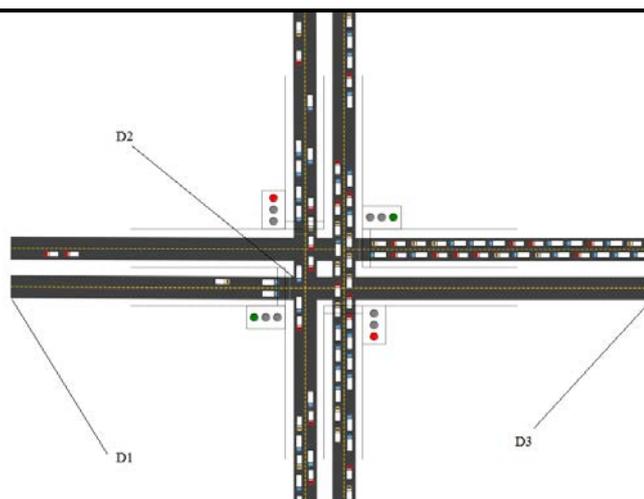


Рис. 1. Расположение датчиков в схеме имитационной модели в среде Anylogic

светофора и считывает въезжающие на дорогу автомобили, датчик D2 устанавливается на линии светофора и убирает из счетчика покидающие участок автомобили. Датчик D3 устанавливается на отдалении от светофора и считает количество покинувших зону автомобилей за время работы зеленого сигнала светофора. Таким образом, можно вычислить число автомобилей, которые покинули дорогу за прошлый цикл горения и успели подъехать к светофору за время горения красного сигнала. Аналогично считается такое же число для перпендикулярного направления дороги. Количества автомобилей и значения длительностей зеленых сигналов должны попасть в блок нечеткого логического вывода (НЛВ), который выдаст конкретные значения  $T_{\text{сдвига}}$ , на которые следует изменить длительности зеленых сигналов светофоров.

Для реализации этой методики в пакете имитационного моделирования необходимо было применить один из алгоритмов НЛВ [6]. В данной работе был применен популярный алгоритм Мамдани (Mamdani), предложенный в 1975г., который, как известно, состоит из следующих этапов: фаззификация входных переменных, формирование базы правил системы НЛВ, агрегирование подусловий правил, активизация подзаключений, аккумуляция подзаключений, дефаззификация.

На этапе *фаззификации* значениям всех входных переменных системы НЛВ, полученным внешним по отношению к системе НЛВ способом (в нашем случае, при помощи датчиков), ставятся в соответствие конкретные значения функций принадлежности соответствующих лингвистических термов, которые используются в заключениях нечетких правил (НП), составляющих базу правил системы НЛВ. Каждый цикл работы диаграммы состояний светофоров датчиками считывается определенное количество автомобилей, являющееся четким числом, которое требуется представить нечетким множеством. В данной работе использована простейшая треугольная форма функции принадлежности.

Определим терм-множество (множество допустимых значений лингвистической переменной) для количества автомобилей как {"очень мало", "мало", "средне", "много", "очень много"}. Длительность работы зеленого сигнала светофора является динамически изменяемой величиной. Определим терм-множество для значения длительностей сигналов, как {очень малая, малая, средняя, большая, очень большая}. Для составления таблицы НП выполним фаззификацию изменения длительности сигналов, определив терм-множество изменения времени сигналов светофоров как {"сильно уменьшить", "уменьшить", "оставить", "увеличить", "сильно увеличить"}. Ограничим возможность изменения времени от -20 до +20 секунд.

Секция 1

Формирование базы правил (БП) работы нечеткой системы (НС) в данном случае – это построение системы НП, отражающей знания экспертов о работе светофора в различных условиях. В тех случаях, когда экспертных данных оказывается недостаточно, требуется обучение НС. В нашем случае речь идет о подборе параметров аналитического представления треугольных функций принадлежности на основе экспериментальных данных. Для настройки НС светофорного регулирования могут быть использованы данные выборки результатов оптимизации длительности фаз регулирования на основе работы программы TRANSYT[7].

Для целей данной работы достаточно экспертных оценок и здравого смысла, взяв за основу *условие равновесия*: если на дороге «среднее» количество автомобилей и длительность зеленого сигнала тоже «средняя», время зеленого светофора следует оставить без изменения (аналогично в случаях «очень мало» и «очень малая» и подобных). Тогда предположим, что, если количество автомобилей уменьшится до «очень малого», а длительность будет «средней» – время необходимо «сильно уменьшить», а если автомобилей станет «очень много», тогда время необходимо «сильно увеличить». Таким же способом определяем параметры для других ситуаций.

Исходя из такого предположения, БП для поставленной задачи будет выглядеть следующим образом:

- Правило 1: ЕСЛИ машин (М) очень мало И длительность (Т) очень малая ТО время работы зеленого сигнала (tg) оставить
- Правило 2: ЕСЛИ М очень мало И Т малая ТО tg уменьшить

и т.д. всего 25 правил.

Заметим, что в силу наложения функций принадлежности друг на друга одновременно могут срабатывать сразу несколько правил. Не останавливаясь на понятиях агрегирование, активизация и аккумуляция, как хорошо известных, отметим лишь, что в данной работе дефазификация осуществляется методом центра тяжести, когда для каждой лингвистической переменной осуществляется переход от дискретного множества нечетких значений к единственному четкому значению

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{z} c_i}{\sum_{i=1}^n c_i}, \quad (1)$$

где n - количество правил нечеткой логики, в подзаключениях которой фигурирует данная лингвистическая переменная,  $c_i$  - степень истинности подзаключений,  $\bar{z}$  - вес максимального значения лингвистической переменной.

### Реализация в среде Anylogic

Элементы библиотеки дорожного движения генерируют поток машин и управляют перемещением автомобилей по дорожному полотну в имитационной модели, общий вид которой показан на рис.2. В интерфейсе модели есть возможность индивидуального задания максимального количества автомобилей и максимальной длительности зеленого сигнала для каждого светофора. Помимо расчетных данных о проехавших автомобилях, демонстрируется динамика изменения количества автомобилей, получивших отказ в обслуживании по обоим методам регулирования. В данной модели помимо библиотеки дорожного движения для реализации алгоритмов работы светофоров, используются диаграммы состояний, работа которых обеспечивает последовательную смену состояний светофора через определенные интервалы времени.

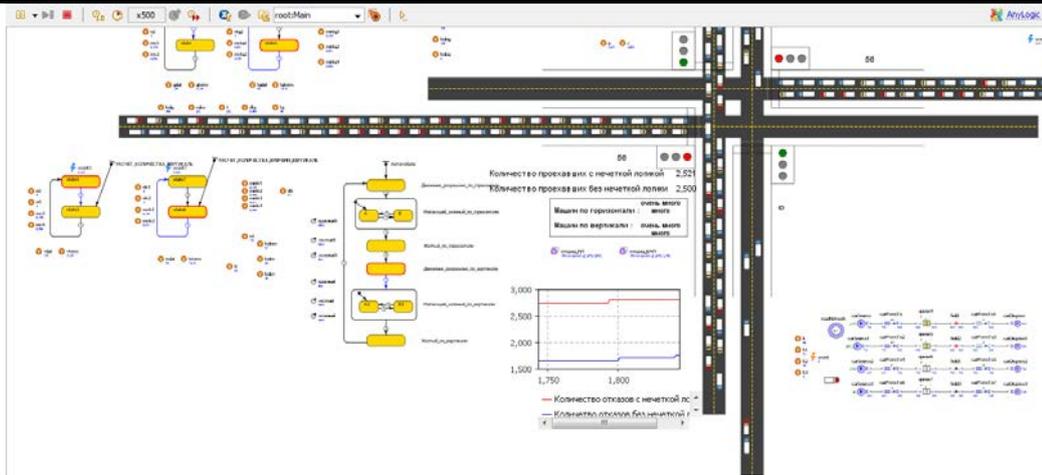


Рис. 2. Общий вид имитационной модели

### Реализация алгоритма работы блока нечеткой логики

В программе AnyLogic блок нечеткой логики (НЛ) выглядит следующим образом (рис.3). Список основных переменных: *gdat* - максимальное значение числа автомобилей, *gterm* - число термов для *gdat*; *kolg* - входной параметр для количества автомобилей (показания датчиков); *mx1(2)* - функции принадлежности для переменной *kolg*; *n1(2)* - числовое представление термов для переменной *kolg*; *tgdat* - максимальное значение для длительности зеленого сигнала светофора; *tgterm* - число термов для *tgdat*; *tg* - входной параметр для длительности зеленого сигнала; *mxtg1(2)* - функции принадлежности для переменной *tg*; *ntg1(2)* - числовое представление термов для переменной *tg*; *dtg* - выходной параметр, величина изменения *tg*.

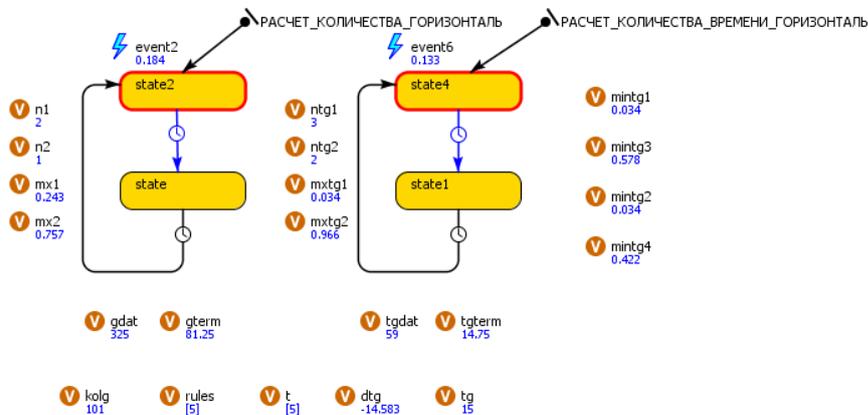


Рис. 3. Блок НЛ

На вход в диаграмме состояний "РАСЧЕТ\_КОЛИЧЕСТВА\_ГОРИЗОНТАЛЬ" и "РАСЧЕТ\_КОЛИЧЕСТВА\_ВРЕМЕНИ\_ГОРИЗОНТАЛЬ" подаются переменные *kolg* и *tg*. В цикле состояния *state* происходит вычисление истинностей (*mx1*, *mx2*) для значения *kolg* в зависимости от того, в какой диапазон значений (в какие термы) оно попало и вычисление численных значений этих термов *n1* и *n2*. Аналогично, в цикле состояния *state1* происходят вычисления истинностей (*mxtg1*, *mxtg2*) и численных значений термов (*ntg1*, *ntg2*) для значения *tg*. Все вычисления происходят за 0.1 секунды до включения зеленого света. В элементе Желтый\_по\_вертикали (переход в новый цикл светофора) модуля светофоров на выходе происходит агрегирование полученных истинностей *mx1*, *mx2*, *mxtg1*, *mxtg2*, затем активизация, аккумуляция и дефаззификация.

Секция 1

Таким образом вычисляется величина  $dtg$ , на которую следует изменить текущую длительность, исходя из базы НП. Аналогичные действия производятся со второй дорогой на перекрестке.

**Результаты моделирования**

Как известно, *интенсивность ТП* - это величина обратная интервалу движения между машинами или число ТС, проезжающих через сечение дороги за единицу времени (в данном случае за 1 минуту). Высокой интенсивности соответствует значение 0.7 авт/мин (42 авт/ч, очень высокой – 1.6 авт/мин (100 авт/ч).

Требуется сравнить эффект от управления по НП со светофором, работающим по фиксированному плану. В качестве сравнения при моделировании используем параметр - количество проехавших перекресток автомобилей за одно и то же время для перекрестка, управляемого по НП, и перекрестка со статичными значениями длительностей фаз светофоров.

Эксперимент 1.

Пусть доминирует движение по одному направлению на улицах перекрестка (утро- движение в город). С-Ю изменение - в диапазоне от 0.1 до 1, Ю-С - 0.1. Интенсивность в перпендикулярном направлении З-В :0.2 (низкая), 0.5 (средняя), 1 (очень высокая), В-З – 0.1. Фазы светофора: зеленый свет 30 секунд, красный свет 20 секунд. Длительность моделирования - 3500 секунд (примерно 50 циклов работы светофора). На рис. 5 приведены иллюстрации расчетов, которые также представлены трендовыми зависимостями, хорошо аппроксимируемыми полиномами 4-й степени. Как можно наблюдать, здесь положительный эффект от использования НП наблюдается при средней, высокой и очень высокой интенсивности движения в перпендикулярном направлении и относительно низкой в прямом при относительно низкой интенсивности встречного движения. Прирост пропускной способности доходит до 27%. Отрицательный эффект наблюдается при близких значениях интенсивности движения в перпендикулярных направлениях в окрестности средних значений и выше.

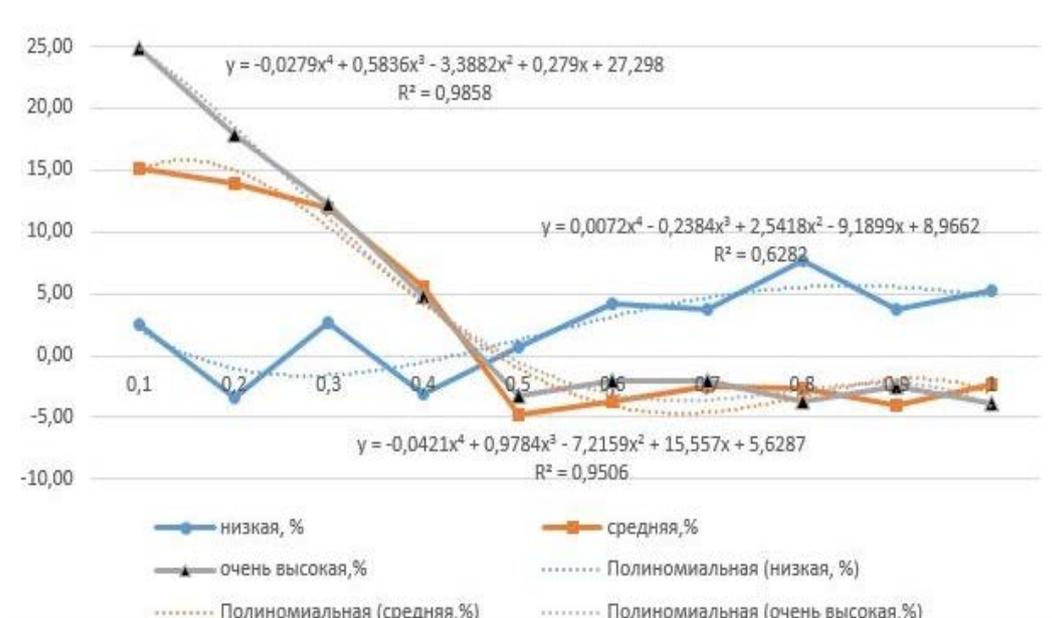


Рис. 4 Границы эффективности управления перекрестком по НП

### Секция 1

---

Наибольший эффект при моделировании достигается при близких к максимальным интенсивностям встречного движения, например, при В-З 0.1; З-В 0.1; С-Ю 1.0; Ю-С 1.0 получим прирост пропускной способности 32%.

Рассмотрим результаты моделирования применимо к реально существующим перекресткам Санкт-Петербурга при разных ситуациях и значениях интенсивности в каждом направлении.

Эксперимент 2: перекресток: пересечение Сызранской и Рошинской улиц. Фазы светофора: зеленый свет 30 секунд, красный свет 20 секунд. Длительность моделирования - 3500 секунд. Моделирование ситуации в час пик. Интенсивность движения по Рошинской улице - высокая (0.6), по Сызранской - малая (0.1) Средний процент прироста пропускной способности за 10 экспериментов - 27.5%

Эксперимент 3: перекресток: пересечение Бухарестской улицы и улицы Белы Куна. Фазы светофора: зеленый свет 50 секунд, красный свет 20 секунд. Длительность моделирования - 3500 секунд (примерно 38 циклов работы светофора). Моделирование ситуации в час пик. Интенсивность движения по Бухарестской улице - средняя в направлении проспекта Славы (0.5) и высокая в направлении улицы Фучика (0.7), по улице Белы Куна - малая в направлении Софийской площади (0.2) и высокая в направлении Будапештской улицы (0.6). В данной ситуации средний процент прироста пропускной способности за 10 экспериментов составляет всего 5.4%.

### Выводы

Разработан алгоритм управления работы светофорных объектов на перекрестке с использованием НЛВ по Мамдани. На входе алгоритма - два четких числа: количество автомобилей и длительность зеленого сигнала, а на выходе четкое значение времени, на которые необходимо изменить текущее значение длительности зеленого сигнала светофора. Разработанный алгоритм успешно интегрирован в среду Anylogic, в которой для целей оценки эффекта от нечеткого регулирования была создана соответствующая имитационная модель. Модель легко адаптируется к произвольному перекрестку, учитывает не только пропускную способность дороги (суммарное количество проехавших автомобилей за время зеленого сигнала), но и величину очередей, образующихся перед светофорами. Представлены и обработаны данные, собранные при моделировании нескольких ситуаций на реальных перекрестках Санкт-Петербурга. Результаты моделирования показывают, что установка систем автономного регулирования позволяет уменьшить время простоя автомобилей (нагрузку на двигатели, расход бензина, вредные выбросы) по сравнению с обычным светофором в среднем от 5% до 30%.

В дальнейшем, на основе данной модели, предполагается исследовать влияние изменения коэффициентов наклона входных и выходных параметров функций принадлежности, числа и формы этих функций, а также степени взаимного наложения функций на вид статической характеристики «нечеткого светофора».

### Литература

1. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений: Пер. с англ.—М.: Мир, 1976, 166 с.
2. Вовк О.Л. Исследование трудноформализуемых алгоритмов нечёткого управления в системах управления объектами. Автореферат магистерской выпускной работы, Донецк, 2002.
3. В.Г.Кочерга, Е.Е., Шаталова Технические средства современных автоматизированных систем управления дорожным движением. Ростов-на-Дону 2011 - 108с.
4. Кретов А.Ю. Обзор некоторых адаптивных алгоритмов светофорного регулиро-

### Секция 1

---

- вания перекрестков. Известия Тульского государственного университета 2013, Технические науки Выпуск 7 Часть 2, Тула: Издательство ТулГУ. — 390 с.
5. Кременец Ю.А., Печерский М.П., Афанасьев М.Б. Технические средства организации дорожного движения: Учебник для вузов. М.Ж ИКЦ «Академкнига», 20054.-279с
  6. Рубанов В. Г. Интеллектуальные системы автоматического управления. Нечеткое управление в технических системах: учебное пособие / В. Г. Рубанов, А. Г. Филатов ; БГТУ им. В. Г. Шухова. — 2-е изд., стер. — Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2010. — 170 с
  7. **Оптимизационный пакет регулирования дорожным движением Transyt-7FR. Разработчик корпорация AGA Group Inc.**  
<http://www.againc.net/ru/education/transport-engineering/11-transyt-software>
  8. Система имитационного моделирования AnyLogic, <http://www.xjtek.ru/anylogic>
  9. Пакет имитационного моделирования дорожного движения VISSIM,  
<http://www.ptv-vision.ru/>